

ИССЛЕДОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МГД-ТЕХНОЛОГИЙ В ПЛАВИЛЬНО-ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Тимофеев В.Н., Маракушин Н.П., Хацаюк М.Ю., Темеров А.С., Гудков И.С.

Кафедра «Электротехнологии и электротехника», Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики», Красноярск, Россия

Аннотация – В данной работе приведены разработки МГД технологий и устройств коллектива кафедры «Электротехнологии и электротехника» СФУ в сотрудничестве с научно-инжиниринговым предприятием ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» для плавно-литейного производства алюминиевых сплавов. Приведены примеры использования МГД технологий в процессах плавления, рафинирования и гомогенизации на основе использования индукционной печи с электромагнитными вращателями расплава в канальной части.

Ключевые слова – магнитная гидродинамика, индукционная канальная печь, электромагнитные вращатели, алюминиевые сплавы, плавление, рафинирование, гомогенизация.

ВВЕДЕНИЕ

В 1995 г. в Красноярском государственном техническом университете создана кафедра «Электротехнология и электротехника» для подготовки инженеров, аспирантов и докторантов. С момента создания кафедры выпущено более 100 инженеров, защищены 3 докторских и около 30 кандидатских диссертаций. Основой для создания кафедры стал опыт научно-инжинирингового предприятия ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики», созданного в 1990 году с целью разработки, проектирования и внедрения «под ключ» электротехнологий и оборудования для цветной металлургии. В 2013 г. предприятие стало Лауреатом Всероссийского конкурса «ТехУспех» и вошло в список 100 лучших высокотехнологичных инновационных компаний России. Большинство преподавателей и научных сотрудников кафедры являются сотрудниками НПЦ Магнитной гидродинамики и других малых инновационных предприятий, созданных в последнее время. В докладе проведен анализ некоторых работ, выполненных на кафедре.

МГД-ТЕХНОЛОГИИ В ПЛАВИЛЬНО-ЛИТЕЙНОМ
ПРОИЗВОДСТВЕ

Алюминий, который производится на электролизных заводах, называется первичным. Производство первичного алюминия – очень энергоемкий процесс. Поэтому электролизные заводы строятся в местах с богатыми энергетическими ресурсами. Восточная Сибирь обладает мощной энергетической базой, включающей гидроэлектростанции реки Енисея и его притоков, тепловые станции Канско-Ачинского угольного бассейна. Дешевая электроэнергия способствовала созданию в этом регионе мощного производства как первичного алюминия, так и сплавов на его основе. Алюминиевые сплавы находят широкое применение во многих отраслях промышленности: транспорте ~38%; строительстве ~20%; машиностроении ~8%; электротехнике ~5% и других [1]. Этому способствовало удачное сочетание физических свойств алюминиевых сплавов, которые зависят от ряда факторов. В частности, добавление к алюминию легирующих элементов (медь, кремний, магний, цинк, марганец и др.) или уже присутствие их в жидкой ванне оказывает существенное влияние на характеристики сплавов.

В алюминиевых сплавах могут присутствовать почти все металлы периодической системы элементов, одни в качестве легирующих элементов, другие в качестве нежелательных примесей. Поэтому плавно-литейное производство алюминиевых сплавов должно предусматривать такие операции как плавление твердого алюминия или алюминиевого лома, добавление легирующих элементов и перемешивание расплава с целью выравнивания химического состава и его температуры во всем объеме ванны, очистка расплава от неметаллических включений (фильтрация), очистка от ненужных примесей (рафинирование), удаление газов из расплава (дегазация), получение из расплава слитков в твердом состоянии (кристаллизация), транспортировка расплава от одного технологического оборудования к другому.

На всех этапах плавно-литейного производства возможно использование магнито-гидродинамических (МГД) технологий, основанных на взаимодействии жидких металлов с электромагнитным полем.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ ПЛАВЛЕНИЯ

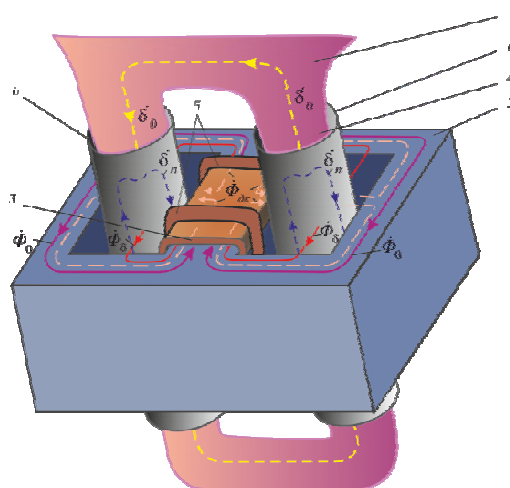
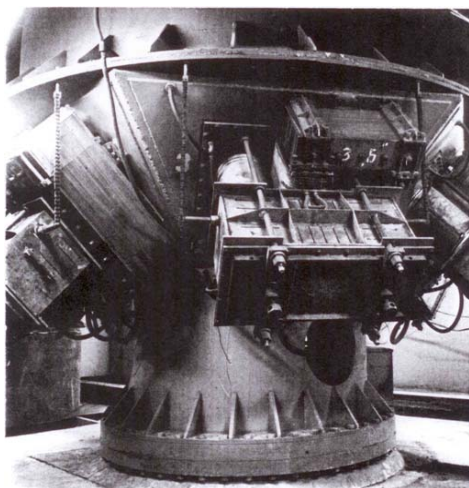


Рис. 1. Индукционная каналная печь ИАК-40
Рис. 2. Эскиз индукционной единицы

Плавление твердых отходов алюминиевого производства и лома может осуществляться в электрических индукционных тигельной и каналной печах. Индукционная каналная печь (ИКП) представляет собой электропечь, в которой преобразование электрической энергии в тепловую происходит в индукционных единицах (ИЕ). На рис. 1 представлена фотография ИКП типа ИАК-40, установленной в литейном цехе Красноярского металлургического завода. Печь состоит из футерованной огнеупорным кирпичом ванны и девяти ИЕ. Индукционные единицы выполнены съемными, чтобы иметь возможность быстрой замены вышедшей из строя ИЕ на новую. Эскиз съемной ИЕ представлен на рис. 2.

Конструктивно ИЕ состоит из магнитопровода 2 с обмоткой 3 и футерованной каналной части 4, которая посредством расплавленного металла (расплава) связана с ванной 1. По принципу действия ИЕ аналогична однофазному трансформатору, работающему в режиме короткого замыкания. Одновитковой вторичной обмоткой является каналная часть, заполненная жидким

металлом и часть соединяющегося с ним металла ванны печи.

С целью снижения скорости зарастания каналов окислами целесообразно создать вращательное движение расплава в каналах посредством электромагнитного поля. Наличие больших магнитных полей рассеяния в области каналов позволило предложить два способа и несколько устройств, позволяющих получить эффективное вращательное движение расплава практически не изменяя геометрию ИЕ [2, 3].

Использование МГД-вращателей на промышленных печах типа ИАК показало, что вращательное движение расплава в каналах индукционной единицы позволяет снизить скорость зарастания канала окислами, увеличить тепломассообмен между ванной печи и каналной частью.

Индукционные тигельные печи так же широко используются для плавки черных и цветных металлов. Кроме этого тигельные печи часто используются в комплексе с другими плавильными агрегатами. В этих случаях металл, предварительно расплавленный в

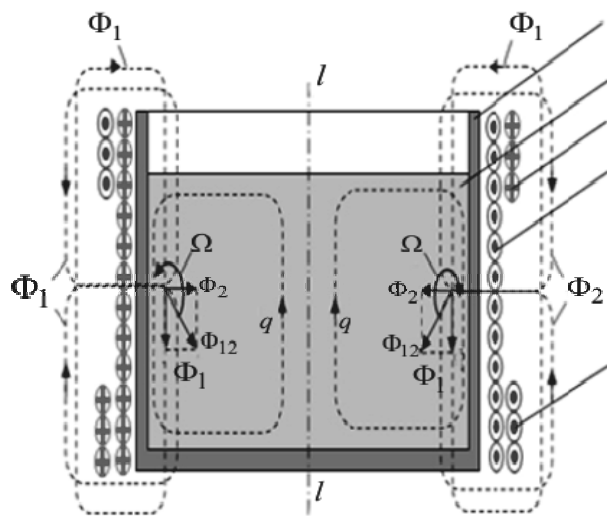
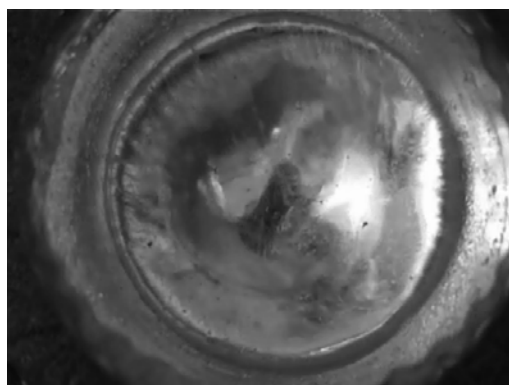


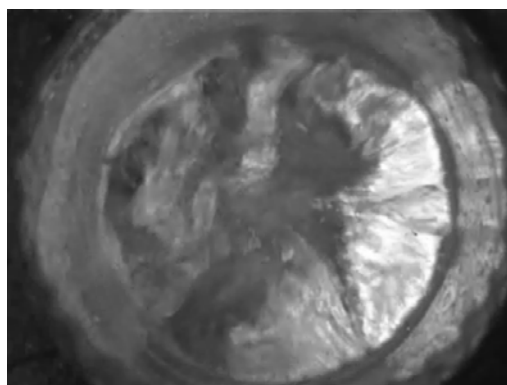
Рис. 3. Эскиз индукционно-тигельной печи



Рис. 4. Физическая модель индуктора



(а)



(б)

Рис. 5. Форма миниска при прямой (а) и при обратной (б) циркуляции металла

плавильном агрегате, поступает затем в индукционную электропечь для рафинирования и доведения до заданного химического состава. Установка также как и индукционная единица канальной печи имеет мощный магнитный поток рассеяния, сосредоточенный между индуктором и металлом и частично проникающий в расплавленный металл.

На рисунке 3 представлен эскиз цилиндрической ванны с жидким металлом. Ванна 1 с металлом 2 помещены в цилиндрический индуктор, состоящий из основной обмотки 3 в виде соленоида и дополнительной катушки 4, выполненной в виде двух секций соединенных встречно. На рисунке 4 представлена фотография физической модели индуктора с основной и дополнительной катушками. При питании основной катушки синусоидальным током, в области металла образуется магнитный поток $\Phi 1$, направленный параллельно оси I-I', а при питании дополнительной катушки синусоидальным током, сдвинутым по фазе относительно тока основной катушки, образуется магнитный поток $\Phi 2$, направленный перпендикулярно оси I-I'.

В результате наложения сдвинутых относительно

друг друга в пространстве и по фазе магнитных потоков $\Phi 1$ и $\Phi 2$ образуется результирующий магнитный поток $\Phi 12$, который будет вращаться в области металла с угловой скоростью Ω , приводя жидкий металл в движение.

На рисунке 5 представлена фотография циркуляции жидкого металла при прямом и обратном вращении магнитного поля в индукторе (Галлий при 50°C).

На рисунке 5(а) металл по оси ванны движется снизу вверх и мы наблюдаем выпуклость. На рисунке 5 (б) металл по оси ванны движется сверху вниз и мы наблюдаем вогнутость.

Индукционная тигельная печь с электромагнитным вращателем позволяет регулировать скорость циркуляции жидкого металла в большом диапазоне, а также осуществлять ее реверсирование, и может использоваться для рафинирования многокомпонентных расплавов.

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ РАФИНИРОВАНИЯ

Установка внепечного рафинирования на основе отъемной индукционной единицы представлена на рисунке 6. Устройство выполнено на базе индукционной единицы с электромагнитным вращателем для

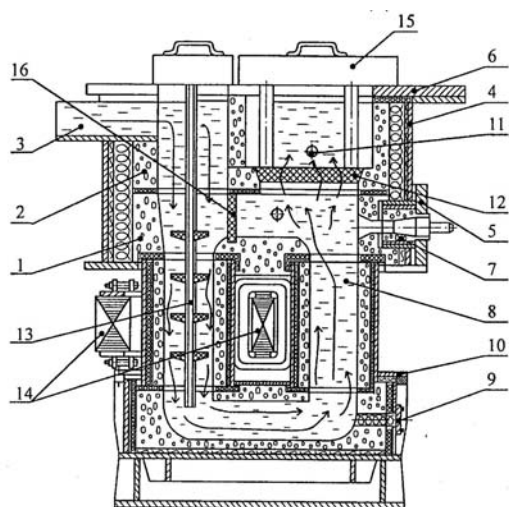


Рис. 6. Установка рафинирования на базе индукционной единицы с электромагнитным вращателем с прямоугольной канальной частью

- 1 – футеровка нижней части ванны;
- 2 – футеровка верхней части ванны;
- 3 – входной лоток;
- 4 – каркас ванны;
- 5 – прижимной фланец;
- 6 – обрамление ванны;
- 7 – лётка для слива металла при замене пенокерамического фильтра;
- 8 – продольный канал;
- 9 – лётка поперечного канала;
- 10 – корпус поперечного канала;
- 11 – рабочая лётка;
- 12 – пенокерамический фильтр;
- 13 – газовод рафинирующей смеси;
- 14 – индуктор с ЭМ-вращателем;
- 15 – съёмная крышка ванны;
- 16 – электропроводная (графитовая) перегородка.

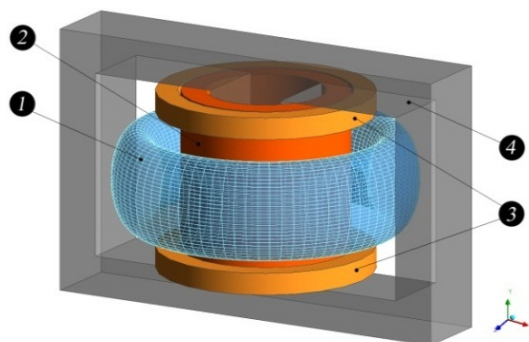


Рис. 7. Эскиз индукционной каналной печи с тороидальной каналной частью

получения вращения расплава в каналах [4]. Ввод в расплав газовой или газопорошковой смеси производится с помощью газоввода, фильтрация жидкого расплава осуществляется через пенокерамический фильтр, который устанавливается в выходном отсеке ванны установки.

Работает устройство следующим образом. Металл из лётки миксера поступает в приёмный отсек устройства, далее – в каналную часть установки, затем проходит через пенокерамический фильтр выходного отсека. Пенокерамический фильтр обеспечивает наиболее тонкую механическую очистку расплава, далее расплав по футерованному раздаточному лотку поступает в кристаллизатор литейной машины. Через специальную форсунку (газовод) в нижнюю часть цилиндрического канала подаётся инертный газ или смесь инертного газа с активными химическими веществами, содержащими хлор или фтор.

Рафинирующее действие инертного газа осуществляется за счёт диффузии водорода, растворённого в расплаве, в пузырьки инертного газа в смеси с химически активными веществами. В качестве инертного газа в данном случае применяется аргон. Фторсодержащие реагенты и, особенно хлор, энергично взаимодействуют с расплавом, образуя твёрдые соединения с вредными примесями, которые в свою очередь поднимаются к пенокерамическому фильтру, где и задерживаются. Наряду с названными реагентами применяются соединения в виде легко возгораемых добавок и тонкодисперсных порошков, содержащих

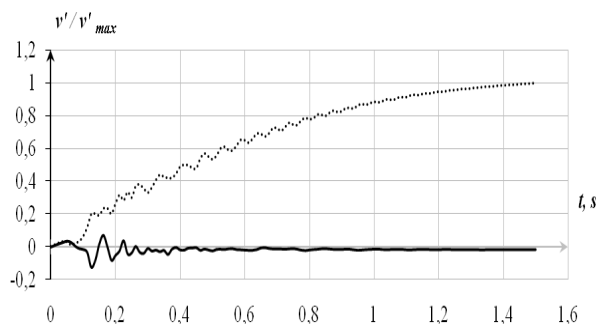


Рис. 9. Динамика компонент v_α (точечная кривая) и v_φ (сплошная кривая) вектора скорости для тора эллиптического сечения

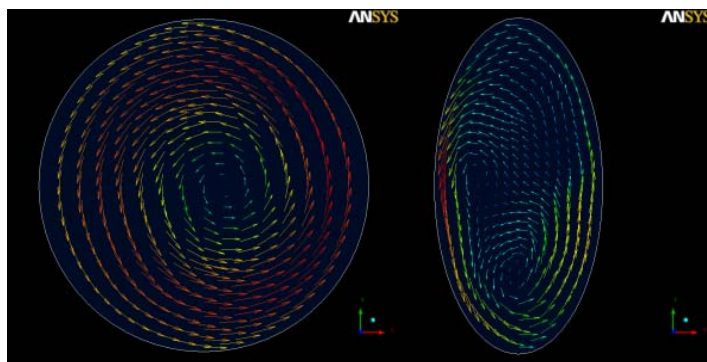


Рис. 8. Поле мгновенных скоростей расплава в торе круглого (слева) и эллиптического (справа) сечений

активный хлор – CCl_4 (четырёххлористый углерод) и фтор (тетрафторборат калия K_2BF_4).

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ ГОМОГЕНИЗАЦИИ

В процессе приготовления многокомпонентных сплавов важно устранить в расплаве все виды неоднородностей. Для устранения макроскопических и микроскопических неоднородностей в расплаве необходимо возбудить крупномасштабные ламинарные и когерентные вихревые движения в сочетании с мелкомасштабными пульсациями. Рассмотрим индукционную единицу с тороидальной каналной частью.

Сечение каналной части может иметь форму круга или эллипса [5]. На рисунке 7 представлен эскиз индукционной единицы с тороидальной каналной частью. Здесь 1 – тороидальная каналная часть; 2 – основная обмотка индуктора; 3 – дополнительная обмотка в виде двух секций; 4 – магнитопровод.

При подключении основной и дополнительной обмоток к сети двухфазного переменного напряжения в расплаве каналной части образуется вращательное движение. На рисунке 8 показано поле мгновенных скоростей расплава в фторе круглого (слева) и эллиптического (справа) сечений.

Если при круглом сечении характер вращения расплава близок к вращению твердого тела, то при эллиптическом сечении движение расплава имеет более сложный характер. Это обстоятельство подтверждается

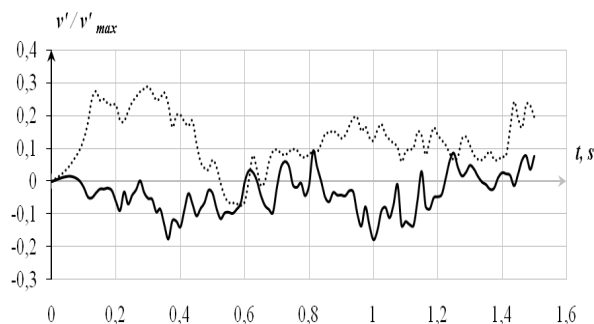


Рис. 10. Динамика компонент v_α (точечная кривая) и v_φ (сплошная кривая) вектора скорости для тора эллиптического сечения

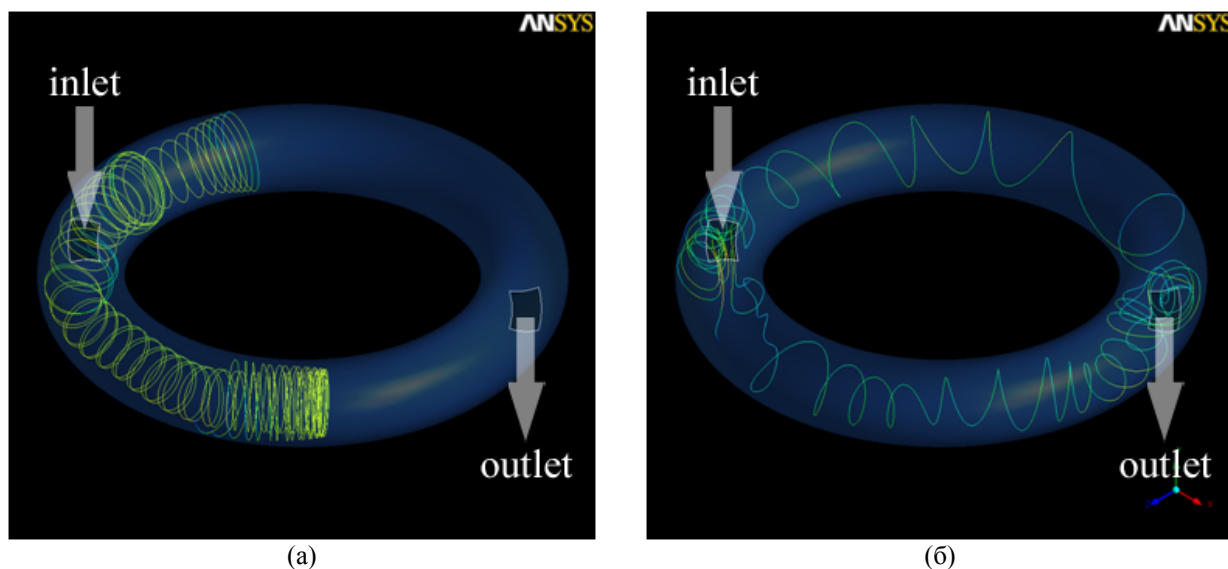


Рис. 11. Траектории частицы расплава от входа к выходу в торе круглого сечения при разных давлениях на входе

зависимостями угловой и v_a осевой v_ϕ составляющими скорости расплава от времени после включения обмоток. Такие зависимости представлены на рисунке 9 и рисунке 10 соответственно для круглого и эллиптического сечений.

В круглом сечении с течением времени пульсация скорости затухает, угловая составляющая принимает установившееся значение, а осевая составляющая стремится к нулю. В эллиптическом сечении пульсации скорости с течением времени не затухают и в движении расплава присутствуют как угловая, так и осевая составляющие. Такой характер движения наиболее эффективен для устранения микронеоднородностей.

Если тороидальная канальная часть имеет вход и выход, то время нахождения частиц расплава в канальной части зависит от разности давлений между входом и выходом, а также скорости вращения расплава. На рис. 11 представлены траектории частицы расплава от входа к выходу в торе круглого сечения при разных давлениях на входе. Таким образом, рассмотренная установка позволяет управлять степенью гомогенизации расплава, изменяя время его нахождения в торе и воздействуя на его структуру различными пульсациями.

4. Маракушин Н.П. Индукционная установка для рафинирования алюминиевых расплавов.: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. 05.09.03 / Н.П. Маракушин. – КГТУ. – Красноярск, 2002, 171с.

5. Тимофеев, В.Н. Управление конвективными потоками расплава в канальной части индукционной печи / Тимофеев В.Н., Хацаюк М.Ю. / Известия академии наук. Энергетика. – 2013. – № 3. – С. 130–136.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рециклинг алюминия. Справочное руководство / К. Шмитц, И. Домагала, П. Халг / Пер. с англ. М.: «АЛЮСИЛ МВнТ», 2008. С. 528. Илл. 327. Табл. 39.
2. А.с. 1206902 (СССР). Способ вращения электропроводного тела / Ю.М. Гориславец, А.Ф. Колесниченко, А.А. Темеров, В.Н. Тимофеев, Р.М. Христинич. – Оpubл. в БИ, 1986, № 3.
3. А.с. 1300284 (СССР). Отъемная индукционная единица / С.А. Бояков, В.А. Золотухин, А.А. Темеров, В.Н. Тимофеев, Р.М. Христинич. – Оpubл. в БИ, 1987, № 12.